

## 明 細 書

JAP20 Rec'd PCT/JP 28 JUN 2006

## 受信装置

## 技術分野

- [0001] 本発明は、マルチキャリア伝送方式を採用した有線または無線の伝送システムにおける受信装置に関し、より特定的には、搬送波周波数誤差及びクロック周波数誤差を補正することができる受信装置に関する。

## 背景技術

- [0002] 近年、デジタル信号の伝送方式として、マルチキャリア伝送方式が注目されている。マルチキャリア伝送方式は、伝送すべきデータを直列並列変換してシンボル速度を下げた後、互いに直交する複数のサブバンドの振幅及び位相にデータを割り当てて伝送する変調方式である。マルチキャリア伝送方式は、伝送帯域を複数のサブバンドに分割してデータを伝送する。したがって、マルチキャリア伝送方式は、サブバンド毎の変調方式を変えることができる。よって、マルチキャリア伝送方式は、柔軟に、周波数を利用することができる。また、マルチキャリア伝送方式では、シンボル速度が下がるので、遅延波に対する耐性が上がる。ゆえに、マルチキャリア伝送方式は、マルチパス妨害に対して強い伝送方式である。
- [0003] マルチキャリア伝送方式として、OFDM(orthogonal frequency division multiplexing:直交周波数分割多重)や、直交ウェーブレット関数を用いたウェーブレット変調方式などが提案されている。
- [0004] 図10は、特許文献1で開示されている従来のOFDM受信装置210の構成を示す図である。図10において、OFDM受信装置210は、A/D変換回路201と、クロック発生回路202と、複素乗算回路203と、ガード相関演算回路204と、数値制御発振回路(NCO:Numerical Controlled Oscillator)205と、高速フーリエ変換回路206と、搬送波周波数誤差演算回路207と、クロック周波数再生回路208と、データ復調部209とを備える。
- [0005] A/D変換回路201は、クロック発生回路202から入力されるクロックに基づいて、受信信号をサンプリングし、受信信号をデジタル信号に変換する。

BEST AVAILABLE COPY

- [0006] 複素乗算回路203は、NCO205から入力される複素正弦波信号とデジタル信号に変換された受信信号とを乗算し、周波数誤差を補正する。
- [0007] 周波数誤差は、まずガード相関演算回路204で粗く推定される。遅延波の耐性を高めるために、OFDM信号は、OFDMシンボル内に、巡回的に繰り返されるガードインターバルを含む。ガード相関演算回路204は、入力されたOFDM信号と有効シンボル時間だけ遅延させたOFDM信号との間の相関値を演算する。ガード相関演算回路204は、相関がピークとなるタイミングとそのタイミングでのOFDM信号の位相とを求める。ガード相関演算回路204は、求めた位相に基づいて、有効シンボル時間間隔での位相差を求める。当該位相差は、周波数誤差に相当する。したがって、ガード相関演算回路204は、当該周波数誤差を打ち消すように、NCO205を制御する。
- [0008] 当該相関がピークとなるタイミングは、有効シンボルの区間を示している。当該タイミングに基づいて、高速フーリエ変換回路206は、粗い周波数補正がされたOFDM信号を周波数領域の信号に変換し、サブバンド毎の振幅および位相を出力する。データ復調部209は、当該振幅および当該位相に基づいて、各サブバンドのデータを復調する。
- [0009] OFDM信号には、所定のサブバンドに、所定の位相と振幅とを割り当てたパイロット信号が挿入されている。従来のOFDM受信装置では、当該パイロット信号に基づいて、周波数誤差補正や等化が行われていた。
- [0010] 搬送波周波数誤差演算回路207は、高速フーリエ変換回路206から出力される各サブバンドの情報に基づいて、所定のパイロット信号だけを抽出する。搬送波周波数誤差演算回路207は、所定のパイロット信号の位相変化に基づいて、残留周波数誤差を推定する。搬送波周波数誤差演算回路207は、当該残留周波数誤差に基づいて、NCO205を制御する。これによって、より精密な搬送波周波数同期が行われる。
- [0011] クロック周波数再生回路208は、パイロット信号の位相変化からクロック周波数誤差を推定する。クロック周波数再生回路208は、当該クロック周波数誤差に基づいて、クロック発生回路202を制御する。これによって、クロック周波数の補正が行われる。
- 特許文献1:特開平10-308715号公報

## 発明の開示

### 発明が解決しようとする課題

- [0012] しかしながら、上記従来の構成では、クロック周波数誤差を推定するために高速フーリエ変換回路206を用いなければならなかった。高速フーリエ変換回路206における変換処理は、ある程度の時間が必要となる。したがって、従来の構成では、クロック周波数制御ループが収束するまでに、ある程度の時間が必要であるという課題があった。
- [0013] また、OFDMでは、搬送波周波数誤差が大きい場合、サブバンド間が直交しなくなる場合がある。これにより、サブバンド間で干渉が起こる。結果、フーリエ変換しても、パイロット信号を正確に抽出できないという問題が発生する。上記従来の構成では、ガードインターバルの相関を利用して粗い周波数誤差の補正を行っている。しかし、有効シンボル時間間隔での位相差を用いた場合では、サブバンド間隔以下の周波数誤差しか推定することができない。したがって、サブバンド間隔よりも大きい周波数誤差に対しては、別途周波数誤差推定用の同期シンボルを用いる必要がある。
- [0014] なお、OFDMでは、ガードインターバルの相関を利用して、粗い周波数誤差推定と有効シンボルタイミング推定とを行うことができる。しかし、直交ウエーブレット関数を用いてマルチキャリア変調されているウエーブレット変調など、ガードインターバルを必要としない変調方式では、周波数誤差推定と有効シンボルタイミング推定とを行うための同期シンボルを、特別に用いる必要がある。
- [0015] それゆえ、本発明の目的は、搬送波周波数誤差が大きな場合でも、シンボルタイミングの推定、搬送波周波数誤差の推定、およびクロック周波数誤差の推定を短時間で行うことができる受信装置を提供することである。

### 課題を解決するための手段

- [0016] 上記目的を達成するために、本発明は、以下のような特徴を有する。本発明の第1の局面は、同期シンボルを複数繰り返した同期シンボル列がデータシンボル列の前に挿入されている伝送フレームを受信するための受信装置である。同期シンボルは、互いに直交し、搬送波周波数が異なる複数のサブバンドシンボルを合成したシンボルである。複数のサブバンドの搬送波周波数は、所定の周波数間隔で等間隔に配

置されている。同期シンボルは、所定の周波数間隔の逆数の周期で同期パターンを含んでいる。受信装置は、サンプリングクロックを発生するクロック発生部と、クロック発生部が発生したサンプリングクロックに基づいて、伝送フレームをサンプリングして、アナログ／デジタル変換するアナログ／デジタル変換部と、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正する周波数補正部と、周波数補正部からの出力と、同期パターンとの間の相関を求め、同期パターン相関値として出力する同期パターン相関部と、同期パターン相関部からの出力のピークを検出し、ピークタイミングとして出力するピーク検出部と、ピーク検出部から出力されるピークタイミングに基づいて、同期シンボル内の所定のタイミングを出力するタイミング判定部と、タイミング判定部からの出力およびピーク検出部から出力されるピークタイミングに応じて、同期パターン相関部から出力される同期パターン相関値の位相の変化量を検出し、同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定する同期パターン間位相差検出部と、複数のサブバンドシンボルの内、割り当てられているサブバンドシンボルと、周波数補正部からの出力との間の相関をそれぞれ求め、サブバンド相関としてそれぞれ出力する複数のサブバンド相関部と、タイミング判定部からの出力に応じて、サブバンド相関部から出力されるサブバンド相関毎に、所定のシンボル間隔での位相差を求め、シンボル間位相差として出力すると共に、シンボル間位相差に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定するシンボル間位相差検出部と、タイミング判定部の出力に応じて、シンボル間位相差検出部から出力される各シンボル間位相差のサブバンド間での位相差を、サブバンド間位相差として検出し、検出したサブバンド間位相差に基づいて、サンプリングクロックの誤差を推定するサブバンド間位相差検出部と、タイミング判定部の出力に応じて、周波数補正部からの出力を復調するデータ復調部とを備える。周波数補正部は、同期パターン間位相差検出部で推定された周波数誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正した後、シンボル間位相差検出部で推定された周波数誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正する。クロック発生部は、サブバンド間位相差検出部で推定された誤差に基づいて、サンプリングクロックの周波数を補正する。

- [0017] 好ましくは、タイミング判定部は、ピーク検出部から出力されるピークタイミングが同期パターンの間隔で所定回数検出された場合、同期シンボル列の開始タイミングを出力し、ピークタイミングが同期パターンの間隔で検出されなくなれば、同期シンボル列の終了タイミングを出力するとよい。
- [0018] 好ましくは、同期パターン間位相差検出部は、同期パターン相関値の位相の変化量を平均化して、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定し、タイミング判定部から開始タイミングが出力されると、平均化を終了して、推定した周波数の誤差を周波数補正部に入力するとよい。
- [0019] 好ましくは、シンボル間位相差検出部は、タイミング判定部から開始タイミングが出力されると、シンボル間位相差を平均化して、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定するとよい。
- [0020] 好ましくは、シンボル間位相差検出部は、周波数の誤差が大きい場合は、所定のシンボル間隔を短くし、周波数の誤差が小さい場合は、所定のシンボル間隔を長くするとよい。
- [0021] 好ましくは、サブバンド間位相差検出部は、サブバンド間位相差を平均化して、サンプリングクロックの誤差を推定するとよい。
- [0022] 本発明は、直交ウエーブレット関数を用いてマルチキャリア変調されているデータシンボル列を受信するのに有効である。
- [0023] 本発明の第2の局面は、同期シンボルを複数繰り返した同期シンボル列がデータシンボル列の前に挿入されている伝送フレームを受信するための集積回路である。同期シンボルは、互いに直交し、搬送波周波数が異なる複数のサブバンドシンボルを合成したシンボルである。複数のサブバンドの搬送波周波数は、所定の周波数間隔で等間隔に配置されている。同期シンボルは、所定の周波数間隔の逆数の周期で同期パターンを含んでいる。集積回路は、サンプリングクロックを発生するクロック発生部と、クロック発生部が発生したサンプリングクロックに基づいて、伝送フレームをサンプリングして、アナログ／デジタル変換するアナログ／デジタル変換部と、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正する周波数補正部と、周波数補正部からの出力と、同期パターンとの間の相関を求め、同期パターン相関値として出力

する同期パターン相関部と、同期パターン相関部からの出力のピークを検出し、ピークタイミングとして出力するピーク検出部と、ピーク検出部から出力されるピークタイミングに基づいて、同期シンボル内の所定のタイミングを出力するタイミング判定部と、タイミング判定部からの出力およびピーク検出部から出力されるピークタイミングに応じて、同期パターン相関部から出力される同期パターン相関値の位相の変化量を検出し、同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定する同期パターン間位相差検出部と、複数のサブバンドシンボルの内、割り当てられているサブバンドシンボルと、周波数補正部からの出力との間の相関をそれぞれ求め、サブバンド相関としてそれぞれ出力する複数のサブバンド相関部と、タイミング判定部からの出力に応じて、サブバンド相関部から出力されるサブバンド相関毎に、所定のシンボル間隔での位相差を求め、シンボル間位相差として出力すると共に、シンボル間位相差に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定するシンボル間位相差検出部と、タイミング判定部の出力に応じて、シンボル間位相差検出部から出力される各シンボル間位相差のサブバンド間での位相差を、サブバンド間位相差として検出し、検出したサブバンド間位相差に基づいて、サンプリングクロックの誤差を推定するサブバンド間位相差検出部と、タイミング判定部の出力に応じて、周波数補正部からの出力を復調するデータ復調部とを備える。周波数補正部は、同期パターン間位相差検出部で推定された周波数誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正した後、シンボル間位相差検出部で推定された周波数誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正する。クロック発生部は、サブバンド間位相差検出部で推定された誤差に基づいて、サンプリングクロックの周波数を補正する。

- [0024] 本発明の第3の局面は、同期シンボルを複数繰り返した同期シンボル列がデータシンボル列の前に挿入されている伝送フレームを受信するための方法である。同期シンボルは、互いに直交し、搬送波周波数が異なる複数のサブバンドシンボルを合成したシンボルである。複数のサブバンドの搬送波周波数は、所定の周波数間隔で等間隔に配置されている。同期シンボルは、所定の周波数間隔の逆数の周期で同

期パターンを含んでいる。当該方法は、伝送フレームをサンプリングして、アナログ／デジタル変換するステップと、アナログ／デジタル変換された信号と、同期パターンとの間の相関を求め、同期パターン相関値とし、同期パターン相関値のピークを検出し、ピークタイミングとし、ピークタイミングに基づいて、同期シンボル内の所定のタイミングを検出し、所定のタイミングおよびピークタイミングに応じて、同期パターン相関値の位相の変化量を検出し、同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定し、複数のサブバンドシンボルの内、少なくとも二つのサブバンドシンボルと、周波数が補正された信号との間の相関をそれぞれ求め、少なくとも二つのサブバンド相関とし、所定のタイミングに応じて、サブバンド相関毎に、所定のシンボル間隔での位相差を求め、シンボル間位相差とし、シンボル間位相差に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定し、所定のタイミングに応じて、各シンボル間位相差のサブバンド間での位相差を、サブバンド間位相差とし、サブバンド間位相差に基づいて、サンプリングクロックの誤差を推定し、同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて推定された周波数の誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換された信号の周波数を補正し、シンボル間位相差に基づいて推定された周波数の誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換された信号の周波数を補正し、サブバンド間位相差に基づいて推定されたサンプリングクロックの誤差に基づいて、サンプリングクロックの周波数を補正し、補正されたアナログ／デジタル変換された信号を復調する。

- [0025] 本発明の第4の局面は、同期シンボルを複数繰り返した同期シンボル列がデータシンボル列の前に挿入されている伝送フレームを受信するためのコンピュータ装置で実行されるプログラムである。同期シンボルは、互いに直交し、搬送波周波数が異なる複数のサブバンドシンボルを合成したシンボルである。複数のサブバンドの搬送波周波数は、所定の周波数間隔で等間隔に配置されている。同期シンボルは、所定の周波数間隔の逆数の周期で同期パターンを含んでいる。当該プログラムは、伝送フレームをサンプリングして、アナログ／デジタル変換するステップと、アナログ／デジタル変換された信号と、同期パターンとの間の相関を求め、同期パターン相関値とするステップと、同期パターン相関値のピークを検出し、ピークタイミングとするステップ

と、ピークタイミングに基づいて、同期シンボル内の所定のタイミングを検出するステップと、所定のタイミングおよびピークタイミングに応じて、同期パターン相関値の位相の変化量を検出し、同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定するステップと、複数のサブバンドシンボルの内、少なくとも二つのサブバンドシンボルと、周波数が補正された信号との間の相関をそれぞれ求め、少なくとも二つのサブバンド相関とするステップと、所定のタイミングに応じて、サブバンド相関毎に、所定のシンボル間隔での位相差を求め、シンボル間位相差とするステップと、シンボル間位相差に基づいて、アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定するステップと、所定のタイミングに応じて、各シンボル間位相差のサブバンド間での位相差を、サブバンド間位相差とするステップと、サブバンド間位相差に基づいて、サンプリングクロックの誤差を推定するステップと、同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて推定された周波数の誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換された信号の周波数を補正するステップと、シンボル間位相差に基づいて推定された周波数の誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換された信号の周波数を補正するステップと、サブバンド間位相差に基づいて推定されたサンプリングクロックの誤差に基づいて、サンプリングクロックの周波数を補正するステップと、補正されたアナログ／デジタル変換された信号を復調するステップとを、コンピュータ装置に実行させる。

### 発明の効果

- [0026] 本発明によれば、受信装置は、まず、シンボル間隔よりも短い間隔の同期パターン間隔における同期パターン相関値の位相差に基づいて、搬送波周波数誤差を検出して、受信周波数の誤差を補正する。これによって、粗い搬送波周波数誤差が補正される。次に、受信装置は、サブバンドシンボルの相関の位相変化に基づいて、残留周波数誤差を検出する。残留周波数誤差を検出する際、すでに粗い搬送波周波数誤差が補正されているので、受信装置は、精度良く、残留周波数誤差を検出することができる。受信装置は、検出した残留周波数誤差に基づいて、受信周波数の誤差を補正する。これにより、大きな搬送波周波数誤差がある場合でも、受信装置は、精度良く、搬送波周波数誤差を補正することができる。受信装置は、各サブバンドのシン



ボル間位相差に基づいて、サブバンド間位相差を求め、サブバンド間位相差に基づいて、サンプリングクロック周波数誤差を検出し、補正する。これにより、データシンボルの復調誤りを低減することができる。受信装置は、同一の同期シンボルを用いて、タイミング検出、搬送波周波数誤差検出、およびクロック周波数誤差検出を行うことができるので、短時間で、送信側との間の同期を確立することができる。

[0027] また、受信装置は、同期シンボル列が開始するタイミングおよび終了するタイミングを判定することができるので、これらのタイミングに応じて、迅速に搬送波周波数誤差およびクロック周波数誤差を補正することができる。

[0028] また、受信装置は、同期パターン相関値の位相の変化量を平均化することによって、粗い搬送波周波数誤差を推定し、同期シンボル列の開始タイミングが到来すれば、粗い搬送波周波数誤差に基づいて補正するので、その後の搬送波周波数誤差の推定を精度良く行うことができる。

[0029] また、受信装置は、シンボル間位相差を平均化して、搬送波周波数誤差を推定するので、精度良く搬送波周波数誤差を推定することができる。

[0030] また、受信装置は、サブバンド間位相差を平均化して、クロック周波数誤差を推定するので、精度良くクロック周波数誤差を推定することができる。

[0031] また、受信装置は、周波数の誤差が大きい場合は、シンボル間位相差を求めるために比較するシンボルの時間間隔を短くし、周波数の誤差が小さい場合は、シンボル間位相差を求めるために比較するシンボルの時間間隔を長くするので、伝送フレームの受信時期に応じて、精度良く搬送波周波数誤差を推定することができる。

[0032] また、直交ウエーブレット関数を用いたマルチキャリア変調では、サブキャリア間隔をOFDM変調よりも狭くすることができる。サブキャリア間隔が狭くなると、サイドローブが急峻となり、パイロット信号を用いて広範囲の搬送波周波数誤差を補正することおよびクロック周波数誤差を補正することが困難となる。したがって、本発明の同期シンボル列を用いた搬送波周波数誤差補正およびクロック周波数誤差補正は、直交ウエーブレット関数を用いてマルチキャリア変調されているデータシンボル列を受信するのに有効である。

[0033] 本発明のこれらおよび他の目的、特徴、局面、効果は、添付図面と照合して、以下

の詳細な説明から一層明らかになるであろう。

### 図面の簡単な説明

- [0034] [図1]図1は、本発明の実施形態における受信装置1の機能的構成を示すブロック図である。
- [図2]図2は、受信装置1で受信する伝送フレームの一例を示す図である。
- [図3A]図3Aは、同期シンボルSの周波数軸表現を模式的に示す図である。
- [図3B]図3Bは、図3Aに示すように周波数配置されたサブバンドシンボルが合成された同期シンボルの時間軸表現を模式的に示す図である。
- [図4A]図4Aは、搬送波周波数誤差およびクロック周波数誤差が存在しなかった場合を示す図である。
- [図4B]図4Bは、受信時に搬送波周波数誤差がある場合を示す図である。
- [図4C]図4Cは、受信時にクロック周波数誤差がある場合を示す図である。
- [図5]図5は、同期パターン間位相差検出部107における動作を説明するための図である。
- [図6]図6は、一つの同期シンボルが四つの同期パターンの繰り返しから構成され、同期シンボル列が四つの同期シンボルから構成されるとき同期パターン相関値、ピークタイミング、同期シンボル開始タイミング、同期シンボルタイミング、同期シンボル終了タイミングの例を示す図である。
- [図7]図7は、サブバンド相関部を二つとしたときの、サブバンド相関の位相およびシンボル間位相差の平均を示す図である。
- [図8]図8は、サブバンド相関部を二つとしたときの、サブバンド相関のシンボル間位相差およびサブバンド間位相差を示す図である。
- [図9]図9は、本実施形態のプログラムを実行したときの受信装置の動作を示すフローチャートである。
- [図10]図10は、特許文献1で開示されている従来のOFDM受信装置210の構成を示す図である。

### 符号の説明

- [0035] 101 A/D変換部

- 102 クロック発生部
- 103 周波数補正部
- 104 同期パターン相関部
- 105 ピーク検出部
- 106 タイミング判定部
- 107 同期パターン間位相差検出部
- 108-1~108-V サブバンド相関部
- 110 シンボル間位相差検出部
- 111 サブバンド間位相差検出部
- 112 データ復調部

#### 発明を実施するための最良の形態

[0036] 以下本発明の実施形態について、図面を参照しながら説明する。

[0037] 図1は、本発明の実施形態における受信装置1の機能的構成を示すブロック図である。図1において、受信装置1は、A/D変換部101と、クロック発生部102と、周波数補正部103と、同期パターン相関部104と、ピーク検出部105と、タイミング判定部106と、同期パターン間位相差検出部107と、第1~第V(Vは少なくとも2以上の整数)のサブバンド相関部108-1~108-Vと、シンボル間位相差検出部110と、サブバンド間位相差検出部111と、データ復調部112とを備える。

[0038] 図2は、受信装置1で受信する伝送フレームの一例を示す図である。伝送フレームは、同期シンボル列301と、データシンボル列302とを含む。同期シンボル列301は、 $c$ ( $c$ は2以上の整数)個の同期シンボル $S$ を含む。同期シンボル列301において、先頭の同期シンボル $S$ から順に、同期シンボル $S_1, S_2, \dots, S_c$ と表す。同期シンボル $S$ は、 $d$ ( $d$ は2以上の整数)個の同期パターン $P$ を含む。なお、 $d$ は、同期シンボルに用いられるサブバンドの周波数に基づいて、決まる。同期シンボル $S$ において、先頭の同期パターン $P$ から順に、同期パターン $P_1, P_2, \dots, P_d$ と表す。同期シンボル列301は、同期パターン $P$ を $d \times c$ 回繰り返した信号となる。

[0039] まず、図1および図2を参照しながら、受信装置1の動作の概要について説明する。

[0040] 受信装置1は、受信信号をダウンコンバートし、ダウンコンバートされた受信信号を

A/D変換部101に入力する。A/D変換部101は、クロック発生部102が発生するクロックに基づいて、受信信号をアナログ/デジタル変換する。

[0041] A/D変換部101に入力される受信信号の中心周波数は、所望の中心周波数からずれている場合がある。このずれは、主には、送信側でのアップコンバート時の搬送波周波数のずれ、および/または、受信側でのダウンコンバート時の局部発振周波数のずれによって生じる。以下、中心周波数のずれを、搬送波周波数誤差という。

[0042] デジタル信号に変換された受信信号は、周波数補正部103によって、周波数が補正される。周波数補正部103は、後段で検出された周波数誤差に基づいて、受信信号の中心周波数(以下、受信周波数という)を補正する。

[0043] 周波数補正部103による周波数補正のための方法は、特に限定されない。たとえば、A/D変換部101から出力されるアナログ/デジタル変換後の受信信号が複素数で表現されている場合、周波数補正部103は、周波数誤差に応じた複素正弦波を受信信号に乗算することによって、受信周波数を補正する。あるいは、周波数補正部103は、CORDICアルゴリズムを用いて、受信信号の位相を直接変化させることによって、受信周波数を補正してもよい。また、受信信号が実数で表現されている場合、周波数補正部103は、周波数誤差に応じた正弦波を受信信号に乗算し、乗算結果から所望信号だけをフィルタで抽出することによって、受信周波数を補正してもよい。あるいは、周波数補正部103は、受信信号をヒルベルト変換によって複素数表現に変換し、周波数誤差に応じた複素正弦波を受信信号に乗算することによって、受信周波数を補正してもよい。

[0044] 同期パターン相関部104は、周波数補正部103の出力と同期パターンPとの間の相互相関を求め、求めた相互相関を同期パターン相関値として出力する。これにより、同期パターン相関部104は、受信信号と同期パターンPとが一致するタイミングで、同期パターン相関値のピークを出力する。

[0045] ピーク検出部105は、同期パターン相関部104から出力される同期パターン相関値のピークを検出し、検出結果を出力する。以下、同期パターン相関値のピークが到来する時点をピークタイミングという。以下、ピーク検出部105は、検出結果として、ピークタイミングを出力するという。

- [0046] 搬送波周波数誤差が生じている場合、時間的に隣接する第1および第2のピークタイミングにおける第1および第2の同期パターン相関値の位相(第1および第2の位相)は、同一ではなく、ずれている。以下、第1および第2の位相のずれを、同期パターン間位相差という。
- [0047] 同期パターン間位相差検出部107は、ピーク検出部105の出力するピークタイミング毎に、同期パターン相関部104が出力する同期パターン相関値を取得する。同期パターン間位相差検出部107は、同期パターン相関値を取得すると、取得した同期パターン相関値の位相と前回のピークタイミングで取得した同期パターン相関値の位相との差を求め、求めた差を同期パターン間位相差とする。ピークタイミング毎における同期パターン相関値の位相の変化は、概ね、搬送波周波数誤差と対応している。したがって、同期パターン間位相差に基づいて、搬送波周波数誤差を粗く推定することができる。同期パターン間位相差検出部107は、同期パターン間位相差に基づいて、粗い搬送波周波数誤差を推定する。
- [0048] タイミング判定部106は、ピーク検出部105が出力するピークタイミングに基づいて、同期シンボルが到来する所定のタイミングを判定する。ここでは、所定のタイミングとして、同期シンボルが開始する同期シンボル開始タイミングと、同期シンボルが到来する同期シンボルタイミングと、同期シンボルが終了する同期シンボル終了タイミングとがあるとする。タイミング判定部106は、同期パターンPの時間間隔でピークタイミングが所定回数(図2に示す例ではd回)検出されると、同期シンボルが到来していると判定し、判定結果を、同期シンボル開始タイミングとして出力する。また、タイミング判定部106は、同期パターンPの時間間隔でピークタイミングが検出されなくなれば、同期シンボルが終了したと判定し、判定結果を、同期シンボル終了タイミングとして出力する。タイミング判定部106は、同期シンボル開始タイミングから同期シンボル終了タイミングまでの間、同期シンボルSの時間間隔で、同期シンボルタイミングを出力する。
- [0049] 同期パターン間位相差検出部107は、タイミング判定部106から同期シンボル開始タイミングが入力されると、それまでに推定された粗い搬送波周波数誤差を保持し、保持した粗い搬送波周波数誤差を周波数補正部103に入力する。

- [0050] 周波数補正部103は、同期パターン間位相差検出部107から粗い搬送波周波数誤差が入力されると、当該粗い搬送波周波数誤差に基づいて、その後に受信される受信信号の中心波周波数(受信周波数)を補正する。
- [0051] 同期シンボル開始タイミング検出後、周波数補正部103で中心周波数が補正された受信信号は、第1～第Vのサブバンド相関部108-1～108-Vに入力される。
- [0052] 第 $v$ ( $v$ は、1～Vの整数)のサブバンド相関部108- $v$ は、受信信号に含まれる第 $k$ のサブバンドのシンボルと、同期シンボルを構成する既知の第 $k$ のサブバンドのシンボルとの間の相互相関を求める。第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ が求めた相互相関を第 $v$ のサブバンド相関という。たとえば、第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ には、第 $k$ のサブバンドの基底が割り当てられているとする。第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ は、受信信号に第 $k$ のサブバンドの基底を乗算し、受信信号に含まれる第 $k$ のサブバンドのシンボルを抽出する。第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ は、抽出した第 $k$ のサブバンドのシンボルと既知の第 $k$ のサブバンドのシンボルとの間の相互相関を求め、第 $v$ のサブバンド相関を出力する。
- [0053] 同期シンボル開始タイミングが到来すると、周波数補正部103は、同期パターン間位相差検出部107からの粗い搬送波周波数誤差に基づいて、受信周波数を補正する。しかし、粗い搬送波周波数誤差では補正しきれない周波数誤差(以下、残留周波数誤差という)が存在する場合、全てのサブバンドの周波数は、残留周波数誤差分だけ、シフトしてしまう。サブバンド周波数のシフトによって、シンボル時間毎に、各サブバンドには、同じ量の位相回転が生じてしまう。ここで、シンボル時間とは、一つのシンボルの時間間隔のことをいう。同期シンボル列301を受信している場合、同期シンボルSの時間間隔がシンボル時間となる。
- [0054] また、クロック発生部102から出力されるクロックの周波数(以下、クロック周波数という)に誤差がある場合、シンボル時間毎に、各サブバンドには、サブバンドの周波数に応じた位相回転が生じてしまう。
- [0055] シンボル間位相差検出部110は、第1～第Vのサブバンド相関部108-1～108-Vから出力される第1～第Vのサブバンド相関のそれぞれについて、シンボル時間毎に、現在の第1～第Vのサブバンド相関の位相と前回のシンボル時間における第1～

第Vのサブバンド相関の位相との差を検出する。シンボル間位相差検出部110は、検出した差を、第1～第Vのシンボル間位相差とする。シンボル間位相差検出部110は、第1～第Vのシンボル間位相差を平均化して、残留周波数誤差を推定する。シンボル間位相差検出部110は、推定した残留周波数誤差を保持すると共に、当該残留周波数誤差を周波数補正部103に入力する。

[0056] 周波数補正部103は、先に推定された粗い周波数誤差を残留周波数誤差で補正し、その後の受信周波数を補正する。

[0057] シンボル間位相差検出部110は、第1～第Vのシンボル間位相差を、シンボル時間毎に、サブバンド間位相差検出部111に入力する。

[0058] サブバンド間位相差検出部111は、第1～第Vのシンボル間位相差における任意の組み合わせのサブバンド間について、差を求め、求めた差を平均し、平均値をサブバンド間位相差として検出する。サブバンド間位相差検出部111は、サブバンド間位相差に基づいて、各サブバンド周波数に応じた位相回転量を検出し、クロック周波数の誤差(以下、クロック周波数誤差という)を推定する。サブバンド間位相差検出部111は、タイミング判定部106によって同期シンボル終了タイミングが検出されると、推定されたクロック周波数誤差を保持し、当該クロック周波数誤差をクロック発生部102に入力する。

[0059] クロック発生部102は、当該クロック周波数誤差に基づいて、クロックを発生し、その後の受信信号をサンプリングするためのクロック周波数を補正する。

[0060] 同期シンボル終了タイミングが検出された以降は、受信信号のサンプリングクロックが補正され、受信周波数の補正されたデータシンボルがデータ復調部112に入力される。データ復調部112は、タイミング判定部106によって同期シンボル終了タイミングが検出されると、入力されるデータシンボルを復調して、受信データを出力する。

[0061] 次に、各部の詳細な動作について説明する。

[0062] 図3Aおよび図3Bは、本実施形態で用いられる同期シンボルSを説明するための図である。同期シンボルSは、互いに直交し、搬送波周波数が異なる複数のサブバンドシンボルを合成したシンボルである。

[0063] 図3Aは、同期シンボルSの周波数軸表現を模式的に示す図である。図3Aでは、

サブバンドの数は、5つであるとしている。ただし、中心周波数のサブバンドは、使用されない。ここで、各サブバンドシンボルは、所定のサブバンド間隔 $1/T_p$ 毎に配置されているとする。各サブバンドシンボルには、所定の位相と振幅とが割り当てられている。各サブバンドシンボルは、互いに直交する信号であれば良く、例えばフーリエ級数のように複素正弦波を用いたシンボルであってもよし、直交ウェーブレット関数を用いたウェーブレット波形によるシンボルであってもよい。

[0064] 図3Bは、図3Aに示すように周波数配置されたサブバンドシンボルが合成された同期シンボルの時間軸表現を模式的に示す図である。このとき、サブバンド間隔を $1/T_p$ とすると、時間軸では、その逆数である $T_p$ 間隔で繰り返しパターンが現れる。この繰り返し現れるパターンが、同期パターンである。なお、同期シンボルは、少なくとも2つのサブバンドシンボルを合成したシンボルでなければならない。

[0065] 数式を用いて同期シンボルを具体的に説明する。サブバンド番号を $k$ とし、所定のパターンであるサブバンド複素ベクトルを $a_k$ とし、直交基底ベクトルを $b_k$ とした場合、同期シンボル $S$ は、式1で表される。式1において、同期シンボル $S$ は、全てのサブバンドについての $a_k b_k$ の合成信号である。サブバンドシンボルに割り当てられている所定の位相および振幅は、サブバンド複素ベクトルを $a_k$ に基づいて決まる。

$$S = \sum_k a_k b_k \quad \cdot \cdot \cdot \quad (\text{式 } 1)$$

[0066] 直交基底ベクトル $b_k$ としては、互いに直交する直交基底ベクトルが用いられればよい。 $b_k$ が直交基底ベクトルであるための条件は、(式2)である。

$$\sum b_i b_j^* = \begin{cases} 1 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (\text{式 } 2)$$

[0067] たとえば、直交基底ベクトル $b_k$ として、式3で表される離散フーリエ変換(DFT: discrete Fourier transform)による直交基底ベクトルや、式4で表される離散コサイン変換(DCT: discrete cosine transform)による直交基底ベクトル、式5で表される離散ウェーブレット変換(DWT: discrete wavelet transform)による直交基底



ベクトルが用いられる。

$$b_k = \exp(j \frac{2\pi k n t}{N}) \quad \dots \quad (\text{式 } 3)$$

$$b_k = \cos(\frac{2\pi k n t}{N}) \quad \dots \quad (\text{式 } 4)$$

$$b_k = \Psi(a_0^k n t - m b_0) \quad \dots \quad (\text{式 } 5)$$

ここで、 $k$ は、サブバンド番号(すなわち、サブバンドの周波数に対応する値)、 $n$ は、サンプル番号、 $t$ は、サンプル時間、 $N$ は、ポイント数(すなわち、時間領域ではサンプル数、周波数領域ではサブバンド数を表す値)、 $a_0^{-k}$ は、スケーリング係数、 $a_0$ は、定数、 $m b_0$ は、シフト係数、 $m$ は、整数、 $b_0$ は、定数である。

- [0068] 図4A、図4Bおよび図4Cは、搬送波周波数誤差およびクロック周波数誤差が生じた状態で図3Aおよび図3Bに示すような同期シンボルSを受信したときの様子を説明するための図である。
- [0069] 図4Aは、搬送波周波数誤差およびクロック周波数誤差が存在しなかった場合を示す。図4Aの左図は、図3Aに示す送信信号と一致する。したがって、図4Aの右図に示すように、各サブバンドについて、サブバンドの送受信間位相差は、全て0となる。ここで、サブバンドの送受信間位相差とは、送信側でアップコンバートする前のサブバンドシンボルの位相と受信側でダウンコンバートした後のサブバンドシンボルの位相との差のことをいう。
- [0070] 図4Bは、受信時に搬送波周波数誤差がある場合を示す。図4Bの左図に示すように、搬送波周波数誤差によって、全てのサブバンドが同じ量だけ周波数シフトする。周波数シフトによって、受信側でのサブバンドシンボルの位相はずれる。サブバンドシンボルの位相のずれは、全てのサブバンドについて同じ量である。したがって、図4Bの右図に示すように、各サブバンドについて、サブバンドの送受信間位相差は、

一定となる。

- [0071] 図4Cは、受信時にクロック周波数誤差がある場合を示す。クロック周波数がずれるとサンプリング間隔が変わるので、受信側では、同期パターン間隔が変化し、 $T_{pa}$ となる。このため、受信信号のサブバンド間隔は、 $1/T_{pa}$ となり、サブバンド周波数に比例して、周波数のシフト量が変わる。このため、各サブバンドについて、サブバンドの送受信間位相差は、サブバンドの周波数に比例して、図4Cの右図のように変化する。
- [0072] したがって、サブバンドの送受信間位相差を検出することによって、搬送波周波数誤差およびクロック周波数誤差を推定することができる。
- [0073] 同期パターン相関部104は、受信信号と周期 $T_p$ で繰り返される同期パターンとの複素相関(同期パターン相関値)を演算する。これにより、受信信号と同期パターンの波形とが一致するタイミングで複素相関値(同期パターン相関値)のピークが現れる。
- [0074] 搬送波周波数誤差がない場合、ピークタイミングにおける複素相関値(同期パターン相関値)の位相は、時間が経過しても変化しない。
- [0075] 一方、搬送波周波数誤差がある場合、搬送波周波数誤差に応じた位相回転が生じるため、ピークタイミング毎に複素相関値(同期パターン相関値)の位相が変化する。よって、ピークタイミング毎に、すなわち、同期パターン周期 $T_p$ 毎に、複素相関値の位相の変動量を求めると、 $1/T_p$ 以下の粗い搬送波周波数誤差を求めることができる。なぜなら、時間間隔 $T_p$ での位相差が $\pm \pi$ 以上であるとどちらに回転したか(周波数差の正負)が分からなくなる。したがって、時間間隔 $T_p$ において位相検出が可能な範囲は、 $-\pi < \theta < \pi$ である。たとえば、時間間隔 $T_p = 1[\text{sec}]$ の場合、位相差が $\pm \pi$ であるとする、 $2[\text{sec}]$ で位相が一回転するので、 $\pm 0.5\text{Hz}$ の周波数差となる。よって、この例では、周波数誤差検出範囲としては、 $1/T_p = 1\text{Hz}$ となる。ゆえに、同期パターン周期 $T_p$ 毎に、複素相関値の位相の変動量を求めると、 $1/T_p$ 以下の粗い搬送波周波数誤差を求めることができる。なお、下限値は、演算精度に依存する。
- [0076] たとえば、離散フーリエ変換による直交基底を用いたサブバンド信号 $S_k$ を考える。

サブバンド信号 $S_k$ の帯域を $W_k$ とすると、サブバンド信号 $S_k$ は、式6のように表される。

$$S_k = a_k e^{jW_k n t} \dots \text{(式6)}$$

[0077] 搬送波周波数誤差が $\Delta f$ であるとし、クロック周波数誤差によるサンプリング時間誤差(以下、単に、クロック周波数誤差という)が $\Delta t$ であるとする。この場合、受信するサブバンド信号 $r_k$ は、式7のようになる。

$$r_k = a_k e^{jW_k n(t+\Delta t)} e^{j2\pi\Delta f n(t+\Delta t)} \dots \text{(式7)}$$

[0078] 送信されたサブバンド信号 $S_k$ と受信されたサブバンド信号 $r_k$ との相関は、式8のようになる。

$$c_k = \sum r_k s_k^* = \sum r_k (a_k e^{jW_k n t})^* = \alpha e^{j(W_k n \Delta t + 2\pi\Delta f n(t+\Delta t) + \phi)} \dots \text{(式8)}$$

ここで、 $\alpha$ は、送信信号 $S_k$ のシンボル期間と一致するタイミングで最大となる。 $\phi$ は、シンボル区間での位相回転の平均である。

[0079] 受信信号は、全てのサブバンド信号 $S_k$ の合成信号である。したがって、同期パターン相関部104で求められる同期パターン相関値は、全てのサブバンドについて、式8の合成となる。式8より、搬送波周波数誤差 $\Delta f$ がない場合、同期パターン相関値は、時間が経過しても変化しないことが分かる。一方、搬送波周波数誤差 $\Delta f$ がある場合、同期パターン相関値は、搬送波周波数誤差に応じた位相回転が生じることが分かる。このことは、離散フーリエ変換以外の直交基底を用いた場合も同様である。

[0080] 図5は、同期パターン間位相差検出部107における動作を説明するための図である。図5に示すように、受信信号は、同期パターン周期 $T_p$ で同期パターンPを繰り返している。同期パターン相関部104は、受信信号と同期パターンとの間の相関値(同期パターン相関値)を出力する。ピーク検出部105は、同期パターン相関値のピークにおいて、ピークタイミングを出力する。

[0081] 図5に示すように、搬送波周波数誤差がない場合、同期パターン相関値の位相は、変化しない。一方、搬送波周波数誤差がある場合、同期パターン相関値の位相は、

変化する。同期パターン相関値の位相の変化量は、搬送波周波数誤差に対応する。このことは、たとえば、式8から分かる。同期パターン間位相差検出部107は、同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて、 $1/T_p$ 以下の粗い搬送波周波数誤差を求める。

[0082] 同期パターン間位相差検出部107は、ピークタイミングに基づいて、隣接する同期パターン間における同期パターン間相関値の差を、同期パターン間位相差として求め、求めた同期パターン間位相差を位相変化量とする。同期パターン間位相差検出部107は、複数の同期パターン間隔における位相変化量を平均化し、平均化された位相変化量に基づいて、搬送波周波数誤差を推定する。

[0083] タイミング判定部106によって同期シンボル開始タイミングが検出されると、同期パターン間位相差検出部107は、同期シンボル開始タイミングが検出されるまでの間に平均化された位相変動量に基づく搬送波周波数誤差を保持し、当該搬送波周波数誤差を周波数補正部103に入力する。

[0084] 周波数補正部103は、同期シンボル開始タイミング以降の受信周波数を、同期パターン間位相差検出部107に保持された搬送波周波数誤差に基づいて、補正する。

[0085] タイミング判定部106は、ピーク検出部105の出力に基づいて、同期シンボルの開始と終了とを判定する。

[0086] 図6は、一つの同期シンボルが四つの同期パターンの繰り返しから構成され、同期シンボル列が四つの同期シンボルから構成されるとき同期パターン相関値、ピークタイミング、同期シンボル開始タイミング、同期シンボルタイミング、同期シンボル終了タイミングの例を示す図である。

[0087] タイミング判定部106は、ピークタイミングが同期パターン間隔 $T_p$ で所定回数検出されれば、同期シンボル列の開始と判定し、同期シンボル開始タイミングを出力する。図6に示す例では、タイミング判定部106は、同期パターン間隔 $T_p$ でピークタイミングが4回検出できた時点同期シンボル開始タイミングと判定する。

[0088] タイミング判定部106は、同期シンボル開始タイミングの出力後、同期シンボル周期毎に、同期シンボルタイミングを出力する。図6に示す例では、同期シンボルは4つの

同期パターンの繰り返しからなるので、タイミング判定部106は、 $4T_p$ 間隔毎に、同期シンボルタイミングを出力する。

[0089] その後、同期パターン間隔 $T_p$ でピークタイミングが検出されなくなると、タイミング判定部106は、同期シンボル列の終了と判定し、同期シンボル終了タイミングを出力する。

[0090] 同期シンボル開始タイミング以降、粗い搬送波周波数補正がなされた受信信号は、第1～第 $V$ のサブバンド相関部108-1～108- $V$ に入力される。第1～第 $V$ のサブバンド相関部108-1～108- $V$ は、それぞれ、割り当てられたサブバンドについて、同期シンボルを構成するサブバンドシンボルと受信信号との間の複素相関を演算し、サブバンド毎に、送受間位相差を求める。

[0091] 各サブバンドシンボルは、互いに直交し、異なる搬送波周波数を持つ。したがって、第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ に割り当てられたサブバンドシンボルと第 $v$ 以外のサブバンドシンボルとの間の複素相関は0となる。よって、第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ によって求められる相関値は、第 $v$ のサブバンドシンボルについての送受信間位相差である。

[0092] 第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ は、タイミング判定部106から同期シンボルタイミングが出力されたら、サブバンドシンボルの相関演算を行う。第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ は、相関演算の結果を第 $v$ のサブバンド相関として出力する。同期シンボルタイミングの到来する期間、すなわち同期シンボル期間は、同期パターン期間 $T_p$ よりも長い。同期パターン期間 $T_p$ よりも長い同期シンボル期間で、相関演算を行うことで、精密な位相差を検出することができる。なぜなら、相関演算は、比較(積分)するサンプル数が多いほど、雑音の平均化効果が大きいので、相関値の精度が向上するからである。

[0093] 第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ は、マッチドフィルタ等の相互相関を演算する回路で実現される。また、各サブバンドシンボルが単一周波数の複素正弦波である場合、第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ は、一周波数DFTによって相互相関を演算してもよい。その他、第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ は、DFTや、DCT、DWT、フィルタバンク等によって、第 $v$ のサブバンド相関を演算することができる。いずれの演算の場合

も、受信信号と既知のサブバンド信号の複素共役との積を所定時間積分する演算に帰着する。ただし、DFTや、DCT、DWTを用いる場合、第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ は、必要なサブバンドを取り出す演算のみを行えばよい。

[0094] たとえば、式8に示す相関 $C_k$ が、第 $v$ のサブバンド相関部108- $v$ から出力される。

[0095] シンボル間位相差検出部110は、サブバンドシンボル毎に、同期シンボル間でのサブバンド相関の位相差(シンボル間位相差)を求める。同期シンボル間でのサブバンド相関の位相差を、位相変化量とする。シンボル間位相差検出部110は、検出した位相変化量を平均化して、残留周波数誤差を検出する。なお、ここでは、シンボル間位相差検出部110は、同期シンボル間でのサブバンド相関の位相差を求め、シンボル間位相差を求めることとしたが、サブバンド相関の位相差を求める間隔は、同期シンボル間隔でなくてもよい。シンボル間位相差検出部110は、所定のシンボル間隔でサブバンド相関の位相差を求め、シンボル間位相差を求めればよい。

[0096] たとえば、サブバンド相関として、式8に示す相関 $C_k$ が得られる場合、同期シンボルのシンボル期間を $T$ とし、式8における $\alpha$ が最大となる時刻を $mT$ とすると、第 $k$ のシンボル間位相差 $\theta_k$ は、式9のようにして求めることができる。

$$\begin{aligned} c_{k,m+1} \dot{c}_{k,m}^* &= \alpha^2 e^{j(W_k(m+1)\Delta T + 2\pi\Delta f(m+1)(T+\Delta T) + \varphi)} e^{-j(W_k m \Delta T + 2\pi\Delta f m(T+\Delta T) + \varphi)} \\ &= \alpha^2 e^{j(W_k \Delta T + 2\pi\Delta f(T+\Delta T))} \\ \theta_k &= \angle c_{k,m+1} \dot{c}_{k,m}^* = W_k \Delta T + 2\pi\Delta f(T+\Delta T) \quad \dots(\text{式9}) \end{aligned}$$

[0097] 式9から、シンボル間位相差 $\theta_k$ を全てのサブバンドについて平均化すれば、搬送波周波数誤差 $\Delta f$ を推定することができ、残留周波数誤差を求めることができる。

[0098] 図7は、サブバンド相関部を二つとしたときの、サブバンド相関の位相およびシンボル間位相差の平均を示す図である。

[0099] 同期シンボルタイミング毎に、第1および第2のサブバンド相関部108-1, 108-2は、それぞれ、第1および第2のサブバンド相関を出力する。ここでは、同期パターン間位相差検出部107で推定した粗い周波数誤差に基づいて、周波数補正部103が周波数を補正しているが、残留周波数があったとする。

[0100] 残留周波数がある場合、当該残留周波数に応じた一定の位相回転が全てのサブバンドで生じる。このことは、式8の相関 $C_k$ において、 $\Delta f$ がサブバンド帯域 $W_k$ とは関

係ない項として存在していることから分かる。シンボル間位相差検出部110は、同期シンボル間隔で、サブバンド毎の位相変化量(シンボル間位相差)を求め、サブバンド毎に求めた位相変化量(シンボル間位相差)を平均化する。シンボル間位相差検出部110は、平均化した位相変化量(シンボル間位相差)に基づいて、残留周波数誤差を求める。たとえば、式9の  $\theta_k$  に平均化したシンボル間位相差を代入し、 $\Delta t = 0$ と仮定して、 $\Delta f$ を求めることができる。

- [0101] 図7に示す例では、同期シンボル間隔が $4T_p$ であるので、シンボル間位相差検出部110は、 $1/4T_p$ 以内の搬送波周波数誤差を検出することが可能である。
- [0102] シンボル間位相差検出部110は、タイミング判定部106から同期シンボル終了タイミングが出力されると、それまでに平均化した残留周波数誤差を保持し、当該残留周波数誤差を周波数補正部103に inputs。周波数補正部103は、同期シンボル終了タイミング以降の受信信号を、先に保持されている搬送波周波数誤差に加えて、新たに保持された残留周波数誤差を修正するように、受信周波数を補正する。
- [0103] シンボル間位相差検出部110は、サブバンド毎に、同期シンボルタイミングでの位相変化量(シンボル間位相差)をサブバンド間位相差検出部111に inputs。
- [0104] サブバンド間位相差検出部111は、シンボル間位相差検出部110によって求められたサブバンド毎の同期シンボル間隔の位相変化量(シンボル間位相差)を、任意のサブバンド間で比較する。サブバンド間位相差検出部111は、比較結果に基づいて、クロック周波数誤差を検出する。
- [0105] たとえば、シンボル間位相差が、式9の  $\theta_k$  のように表される場合を考える。 $\theta_k$  の時間方向の差、すなわち、シンボル間位相差のサブバンド間の位相差  $\theta_{k+q} - \theta_k$  は、式10のように表される。

$$\theta_{k+q} - \theta_k = [W_{k+q}\Delta T + 2\pi\Delta f(T + \Delta T)] - [W_k\Delta T + 2\pi\Delta f(T + \Delta T)] = (W_{k+q} - W_k) \Delta T$$

...(式10)

- [0106] 式10より、シンボル間位相差のサブバンド間の位相差を求めることによって、クロック周波数誤差  $\Delta f$ を求めることができる。
- [0107] 式8に示すように、クロック周波数誤差  $\Delta f$ を含む項は、サブバンドの帯域  $W_k$  を含んでいる。したがって、図4Cで説明したように、クロック周波数誤差が生じると、サブバ

ンド毎に、送受間位相差が変化することとなる。送受信間位相差の変化の度合いは、サブバンド周波数に比例する。

[0108] 図8は、サブバンド相関部を二つとしたときの、サブバンド相関のシンボル間位相差およびサブバンド間位相差を示す図である。シンボル間位相差検出部110は、同期シンボルタイミング毎に、サブバンド相関の位相変化量(シンボル間位相差)をサブバンド間位相差検出部111に入力する。クロック周波数誤差がある場合、シンボル間位相差検出部110から入力されるサブバンド相関の位相変化量は、サブバンド毎に異なることとなる。サブバンド間位相差検出部は、サブバンド間でサブバンド相関の位相変化量の差(サブバンド間位相差)を求め、求めたサブバンド間位相差を平均化して、クロック周波数誤差を求める。式10の例では、サブバンド間位相差検出部111は、任意の組み合わせでサブバンド間位相差を求める。より好ましくは、複数の組み合わせでサブバンド間位相差を求め、それらを平均化する。任意の間隔のサブバンド間位相差からサブバンド周波数に対する位相変化(図4Cの右図の点線の傾きに相当)を複数求めて平均化することで、雑音の影響を少なくすることができる。

[0109] タイミング判定部106によって同期シンボル終了タイミングが検出されると、サブバンド間位相差検出部111は、サブバンド間位相差の平均値に基づくクロック周波数誤差を保持し、クロック発生部102に入力する。

[0110] クロック発生部102は、保持されたクロック周波数誤差に基づいて、クロック周波数を制御する。A/D変換部101は、補正されたクロック周波数に基づいて、同期シンボル終了タイミング以降の受信信号をサンプリングする。

[0111] 同期シンボル終了タイミング以降の受信データシンボル列は、搬送波周波数誤差およびクロック周波数誤差が補正されており、データ復調部での復調誤りが軽減される。

[0112] このように、本実施形態によれば、受信装置は、まず、シンボル間隔よりも短い間隔の同期パターン間隔における同期パターン相関値の位相差に基づいて、搬送波周波数誤差を検出して、受信周波数の誤差を補正する。これによって、粗い搬送波周波数誤差が補正される。次に、受信装置は、サブバンドシンボルの相関の位相変化に基づいて、残留周波数誤差を検出する。残留周波数誤差を検出する際、すでに



粗い搬送波周波数誤差が補正されているので、受信装置は、精度良く、残留周波数誤差を検出することができる。受信装置は、検出した残留周波数誤差に基づいて、受信周波数の誤差を補正する。これにより、大きな搬送波周波数誤差がある場合でも、受信装置は、精度良く、搬送波周波数誤差を補正することができる。受信装置は、各サブバンドのシンボル間位相差に基づいて、サブバンド間位相差を求め、サブバンド間位相差に基づいて、サンプリングクロック周波数誤差を検出し、補正する。これにより、データシンボルの復調誤りを低減することができる。受信装置は、同一の同期シンボルを用いて、タイミング検出、搬送波周波数誤差検出、およびクロック周波数誤差検出を行うことができるので、短時間で、送信側との間の同期を確立することができる。

[0113] なお、サブバンド相関部は、少なくとも二つ存在すれば、残留周波数誤差およびクロック周波数誤差を求めることができる。

[0114] なお、それぞれのサブバンド相関部に割り当てられているサブバンドは、隣接しているサブバンドでなくてもよい。隣接していないサブバンドを用いる場合であっても、サブバンド間位相差を求める際、サブバンド間位相差検出部111は、二つのサブバンド間の帯域幅を考慮して、クロック周波数誤差を求めればよい。たとえば、式10の例では、サブバンド間位相差検出部111は、クロック周波数誤差 $\Delta t$ を求めるに際し、サブバンド間位相差を二つのサブバンド間の帯域幅で除算することによって、クロック誤差を求めることができる。

[0115] なお、上記では、離散フーリエ変換による直交基底を用いた数式表現によって、本発明の原理を説明した。しかし、本発明は、離散フーリエ変換による直交基底以外にも適用することができ、その場合も、数式表現によって、本発明が実施可能であることを確認することができる。

[0116] なお、上記実施形態において、シンボル間位相差検出部110は、サブバンド相関の位相の比較を、同期シンボルタイミング毎に行うこととした。しかし、サブバンド相関の位相比較の間隔は、可変にしてもよい。つまり、位相比較の間隔を短くすれば、シンボル間位相差検出部110は、搬送波周波数誤差の検出範囲を広くすることができる。逆に、位相比較の間隔を長くすれば、搬送波周波数誤差の検出範囲は狭くなる。

が、シンボル間位相差検出部110は、より精密な検出を行うことができる。よって、受信装置の動作開始時など、周波数誤差が大きな場合は、シンボル間位相差検出部110は、例えば、1同期シンボルタイミング毎に位相比較を行い、搬送波周波数誤差の検出範囲を広くすればよい。その後複数回伝送フレームを受信し、周波数誤差が小さくなっている場合は、シンボル間位相差検出部110は、例えば伝送フレーム間隔の同期シンボルタイミング毎に、位相比較を行い、搬送波周波数誤差の検出範囲を狭めてより精密な検出をすることもできる。たとえば、位相比較間隔 $T_c = 1$  [sec]である場合、位相差が $\pi$ まで存在すれば、0.5Hzまでの周波数誤差が検出できる。位相比較間隔 $T_c = 0.1$  [sec]である場合、位相差が $\pi$ まで存在すれば、5Hzまでの周波数誤差が検出できる。位相比較間隔 $T_c = 10$  [sec]である場合、位相差が $\pi$ まで存在すれば、0.05Hzまでの周波数誤差が検出できる。なお、位相差が $\Delta \phi$ 以下の場合、位相差は、検出できない精度であったとする。このような場合、周波数誤差が小さく、ある位相比較間隔 $T_c$ では位相差が $\Delta \phi$ 以下であっても、シンボル間位相差検出部110は、 $T_c$ を $u$ 倍して位相比較すれば、位相差が $\Delta \phi$ より大きくなるので、位相差を検出することができる。シンボル間位相差検出部110は、値を $u$ で割れば、搬送波周波数誤差を推定することができる。

- [0117] なお、本発明の受信装置は、直交ウエーブレット関数を用いてマルチキャリア変調されているデータシンボル列を受信するのに有効である。直交ウエーブレット関数を用いたマルチキャリア変調では、サブキャリア間隔をOFDM変調よりも狭くすることができる。サブキャリア間隔が狭くなると、サイドローブが急峻となり、パイロット信号を用いて広範囲の搬送波周波数誤差の補正およびクロック周波数誤差の補正が困難となる。なぜなら、サブキャリア間隔が狭くなると、サブキャリア間干渉無くサブキャリアを分離するためには、より精度のよい周波数補正が、サブキャリア分離演算(フーリエ変換などの直交変換)の前に必要となり、データシンボルに埋め込まれたパイロット信号による周波数誤差検出だけでは、周波数誤差の検出範囲は、サブキャリア間隔の数分の1程度となるからである。したがって、本発明の同期シンボル列を用いた周波数誤差補正は、直交ウエーブレット関数を用いてマルチキャリア変調されているデータシンボル列を受信するのに有効である。

- [0118] なお、本実施形態の各機能ブロックは、それぞれの機能を実行することができる手段として実現されていればよく、それぞれ一つのハードウェアの中に実現されていてよいし、別々のハードウェアの中に実現されていてよい。
- [0119] なお、本実施形態の受信装置は、ソフトウェア的に実現することも可能である。具体的には、図9に示す動作を汎用のコンピュータ装置に実行させることができるプログラムを受信装置内の記録媒体に格納しておき、当該コンピュータ装置で当該プログラムを実行させることによって、本実施形態の受信装置を実現することができる。
- [0120] 図9は、本実施形態のプログラムを実行したときの受信装置の動作を示すフローチャートである。以下、図9を参照しながら、本実施形態のプログラムを実行したときの順装置の動作について説明する。
- [0121] まず、受信装置は、受信信号Rと同期パターンPとの間の相関を求め、同期パターン相関値とする(ステップS101)。次に、受信装置は、同期パターン相関値の大きさがピークとなるタイミングを求め、ピークタイミングとする(ステップS102)。次に、受信装置は、ピークタイミング毎に、前回のピークタイミングにおける同期パターン相関値の位相と、今回のピークタイミングにおける同期パターン相関値の位相との差を求め、同期パターン間位相差とする(ステップS103)。
- [0122] 次に、受信装置は、ピークタイミングTが所定回数検出されたか否かを判断し、所定回数検出されたら、同期シンボル開始タイミングが到来したと判断して、それまでに求めた同期パターン間位相差を平均化して、平均値に基づいて、粗い搬送波周波数誤差を推定し、推定した粗い搬送波周波数誤差を保持する(ステップS104)。ステップS101からS104の処理は、同期シンボル列の前半部分での処理である。
- [0123] 受信装置は、粗い搬送波周波数誤差を保持したら、その後の受信信号の周波数を当該粗い搬送波周波数誤差に基づいて、補正する(ステップS105)。
- [0124] 次に、受信装置は、同期シンボルが到来するタイミング毎に、サブバンドシンボルと周波数が補正された受信信号との間の相関を求め、サブバンド相関とする(ステップS106)。サブバンド相関は、少なくとも二つのサブバンドシンボルについて求められる。
- [0125] 次に、受信装置は、所定のシンボル間隔(たとえば、同期シンボル間隔)毎に、前

回のサブバンド相関の位相と、今回のサブバンド相関の位相との差を求め、シンボル間位相差とする(ステップS107)。シンボル間位相差は、少なくとも二つのサブバンドシンボルについて求められる。

[0126] 次に、受信装置は、ステップS107で求められたシンボル間位相差について、サブバンド間での差を求め、サブバンド間位相差とする(ステップS108)。

[0127] 次に、受信装置は、同期パターン相関値の大きさのピークが到来しなくなると、同期シンボル列が終了したと判断して、求めていたサブバンド間位相差を平均化して、クロック周波数誤差を推定する(ステップS109)。

[0128] 次に、受信装置は、求めていたシンボル間位相差を平均化して、残留周波数誤差を求める(ステップS110)。ステップS105～S110までの処理は、同期シンボルの後半部分を受信しているときの処理である。

[0129] 次に、受信装置は、ステップS109で求めたクロック周波数誤差に基づいて補正されたクロックを用いて、その後入力される信号をサンプリングする(ステップS111)。

[0130] 次に、受信装置は、ステップS110で求めた残留周波数誤差に基づいて、サンプリングされた信号の周波数を補正する(ステップS112)。

[0131] 次に、受信装置は、ステップS112で周波数が補正された信号を復調し(ステップS113)、処理を終了する。ステップS111～ステップS113の処理は、データシンボル列を受信しているときの処理である。

[0132] このように、本実施形態に係る受信装置は、ソフトウェア的に実現することも可能である。

[0133] なお、図1に示した各機能ブロックは、集積回路であるLSIとして実現されてもよい。これらの機能ブロックは、1チップ化されていてもよいし、一部又は全てを含むように1チップ化されていてもよい。ここでは、LSIといったが、集積度の違いによっては、IC、システムLSI、スーパーLSI、ウルトラLSIと称呼されることもある。また、集積回路化の手法は、LSIに限られるものではなく、専用回路または汎用プロセッサで集積回路化を行ってもよい。また、LSI製造後にプログラムすることが可能なFPGA(Field Programmable Gate Array)や、LSI内部の回路セルの接続や設定を再構成可能なリコンフィギュラブル・プロセッサを用いてもよい。さらには、半導体技術の進歩ま

たは派生する別技術によりLSIに置き換わる集積回路化の技術が登場すれば、当然、その技術を用いて機能ブロックを集積化してもよい。バイオ技術の適応等が可能性としてあり得る。

- [0134] 以上、本発明を詳細に説明してきたが、前述の説明はあらゆる点において本発明の例示にすぎず、その範囲を限定しようとするものではない。本発明の範囲を逸脱することなく種々の改良や変形を行うことができることは言うまでもない。

#### 産業上の利用可能性

- [0135] 本発明にかかる受信装置は、搬送波周波数誤差が大きな場合でも、マルチキャリア同期プリアンプルを用いてシンボル同期、搬送波周波数同期およびクロック周波数同期を短時間で行えるため、有線または無線伝送装置等に用いるものとして有用である。

## 請求の範囲

- [1] 同期シンボルを複数繰り返した同期シンボル列がデータシンボル列の前に挿入されている伝送フレームを受信するための受信装置であって、
- 前記同期シンボルは、互いに直交し、搬送波周波数が異なる複数のサブバンドシンボルを合成したシンボルであり、
- 前記複数のサブバンドの搬送波周波数は、所定の周波数間隔で等間隔に配置されており、
- 前記同期シンボルは、前記所定の周波数間隔の逆数の周期で同期パターンを含んでおり、
- サンプリングクロックを発生するクロック発生部と、
- 前記クロック発生部が発生した前記サンプリングクロックに基づいて、前記伝送フレームをサンプリングして、アナログ／デジタル変換するアナログ／デジタル変換部と、
- 前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正する周波数補正部と、
- 前記周波数補正部からの出力と、前記同期パターンとの間の相関を求め、同期パターン相関値として出力する同期パターン相関部と、
- 前記同期パターン相関部からの出力のピークを検出し、ピークタイミングとして出力するピーク検出部と、
- 前記ピーク検出部から出力される前記ピークタイミングに基づいて、前記同期シンボル内の所定のタイミングを出力するタイミング判定部と、
- 前記タイミング判定部からの出力および前記ピーク検出部から出力されるピークタイミングに応じて、前記同期パターン相関部から出力される前記同期パターン相関値の位相の変化量を検出し、前記同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定する同期パターン間位相差検出部と、
- 前記複数のサブバンドシンボルの内、割り当てられているサブバンドシンボルと、前記周波数補正部からの出力との間の相関をそれぞれ求め、サブバンド相関としてそれぞれ出力する複数のサブバンド相関部と、
- 前記タイミング判定部からの出力に応じて、前記サブバンド相関部から出力される

前記サブバンド相関毎に、所定のシンボル間隔での位相差を求め、シンボル間位相差として出力すると共に、前記シンボル間位相差に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定するシンボル間位相差検出部と、

前記タイミング判定部の出力に応じて、前記シンボル間位相差検出部から出力される各シンボル間位相差のサブバンド間での位相差を、サブバンド間位相差として検出し、検出した前記サブバンド間位相差に基づいて、前記サンプリングクロックの誤差を推定するサブバンド間位相差検出部と、

前記タイミング判定部の出力に応じて、前記周波数補正部からの出力を復調するデータ復調部とを備え、

前記周波数補正部は、前記同期パターン間位相差検出部で推定された周波数誤差に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正した後、前記シンボル間位相差検出部で推定された周波数誤差に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正し、

前記クロック発生部は、サブバンド間位相差検出部で推定された誤差に基づいて、前記サンプリングクロックの周波数を補正する、受信装置。

- [2] 前記タイミング判定部は、前記ピーク検出部から出力される前記ピークタイミングが前記同期パターンの間隔で所定回数検出された場合、前記同期シンボル列の開始タイミングを出力し、前記ピークタイミングが前記同期パターンの間隔で検出されなくなれば、前記同期シンボル列の終了タイミングを出力する、請求項1に記載の受信装置。
- [3] 前記同期パターン間位相差検出部は、前記同期パターン相関値の位相の変化量を平均化して、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定し、前記タイミング判定部から前記開始タイミングが出力されると、平均化を終了して、推定した前記周波数の誤差を前記周波数補正部に入力する、請求項2に記載の受信装置。
- [4] 前記シンボル間位相差検出部は、前記タイミング判定部から前記開始タイミングが出力されると、前記シンボル間位相差を平均化して、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定する、請求項2に記載の受信装置。

- [5] 前記シンボル間位相差検出部は、前記周波数の誤差が大きい場合は、前記所定のシンボル間隔を短くし、前記周波数の誤差が小さい場合は、前記所定のシンボル間隔を長くする、請求項1に記載の受信装置。
- [6] 前記サブバンド間位相差検出部は、前記サブバンド間位相差を平均化して、前記サンプリングクロックの誤差を推定する、請求項1に記載の受信装置。
- [7] 前記データシンボル列は、直交ウエーブレット関数を用いてマルチキャリア変調されている、請求項1に記載の受信装置。
- [8] 同期シンボルを複数繰り返した同期シンボル列がデータシンボル列の前に挿入されている伝送フレームを受信するための集積回路であって、  
前記同期シンボルは、互いに直交し、搬送波周波数が異なる複数のサブバンドシンボルを合成したシンボルであり、  
前記複数のサブバンドの搬送波周波数は、所定の周波数間隔で等間隔に配置されており、  
前記同期シンボルは、前記所定の周波数間隔の逆数の周期で同期パターンを含んでおり、  
サンプリングクロックを発生するクロック発生部と、  
前記クロック発生部が発生した前記サンプリングクロックに基づいて、前記伝送フレームをサンプリングして、アナログ／デジタル変換するアナログ／デジタル変換部と、  
前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正する周波数補正部と、  
前記周波数補正部からの出力と、前記同期パターンとの間の相関を求め、同期パターン相関値として出力する同期パターン相関部と、  
前記同期パターン相関部からの出力のピークを検出し、ピークタイミングとして出力するピーク検出部と、  
前記ピーク検出部から出力される前記ピークタイミングに基づいて、前記同期シンボル内の所定のタイミングを出力するタイミング判定部と、  
前記タイミング判定部からの出力および前記ピーク検出部から出力されるピークタイミングに応じて、前記同期パターン相関部から出力される前記同期パターン相関値の位相の変化量を検出し、前記同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて、



前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定する同期パターン間位相差検出部と、

前記複数のサブバンドシンボルの内、割り当てられているサブバンドシンボルと、前記周波数補正部からの出力との間の相関をそれぞれ求め、サブバンド相関としてそれぞれ出力する複数のサブバンド相関部と、

前記タイミング判定部からの出力に応じて、前記サブバンド相関部から出力される前記サブバンド相関毎に、所定のシンボル間隔での位相差を求め、シンボル間位相差として出力すると共に、前記シンボル間位相差に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定するシンボル間位相差検出部と、

前記タイミング判定部の出力に応じて、前記シンボル間位相差検出部から出力される各シンボル間位相差のサブバンド間での位相差を、サブバンド間位相差として検出し、検出した前記サブバンド間位相差に基づいて、前記サンプリングクロックの誤差を推定するサブバンド間位相差検出部と、

前記タイミング判定部の出力に応じて、前記周波数補正部からの出力を復調するデータ復調部とを備え、

前記周波数補正部は、前記同期パターン間位相差検出部で推定された周波数誤差に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正した後、前記シンボル間位相差検出部で推定された周波数誤差に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数を補正し、

前記クロック発生部は、サブバンド間位相差検出部で推定された誤差に基づいて、前記サンプリングクロックの周波数を補正する、集積回路。

[9] 同期シンボルを複数繰り返した同期シンボル列がデータシンボル列の前に挿入されている伝送フレームを受信するための方法であって、

前記同期シンボルは、互いに直交し、搬送波周波数が異なる複数のサブバンドシンボルを合成したシンボルであり、

前記複数のサブバンドの搬送波周波数は、所定の周波数間隔で等間隔に配置されており、

前記同期シンボルは、前記所定の周波数間隔の逆数の周期で同期パターンを含

んでおり、

前記伝送フレームをサンプリングして、アナログ／デジタル変換し、

アナログ／デジタル変換された信号と、前記同期パターンとの間の相関を求め、同期パターン相関値とし、

前記同期パターン相関値のピークを検出し、ピークタイミングとし、

前記ピークタイミングに基づいて、前記同期シンボル内の所定のタイミングを検出し

、  
前記所定のタイミングおよび前記ピークタイミングに応じて、前記同期パターン相関値の位相の変化量を検出し、前記同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定し、

前記複数のサブバンドシンボルの内、少なくとも二つのサブバンドシンボルと、周波数が補正された前記信号との間の相関をそれぞれ求め、少なくとも二つのサブバンド相関とし、

前記所定のタイミングに応じて、前記サブバンド相関毎に、所定のシンボル間隔での位相差を求め、シンボル間位相差とし、

前記シンボル間位相差に基づいて、前記アナログ／デジタル変換部からの出力の周波数の誤差を推定し、

前記所定のタイミングに応じて、各前記シンボル間位相差のサブバンド間での位相差を、サブバンド間位相差とし、

前記サブバンド間位相差に基づいて、サンプリングクロックの誤差を推定し、

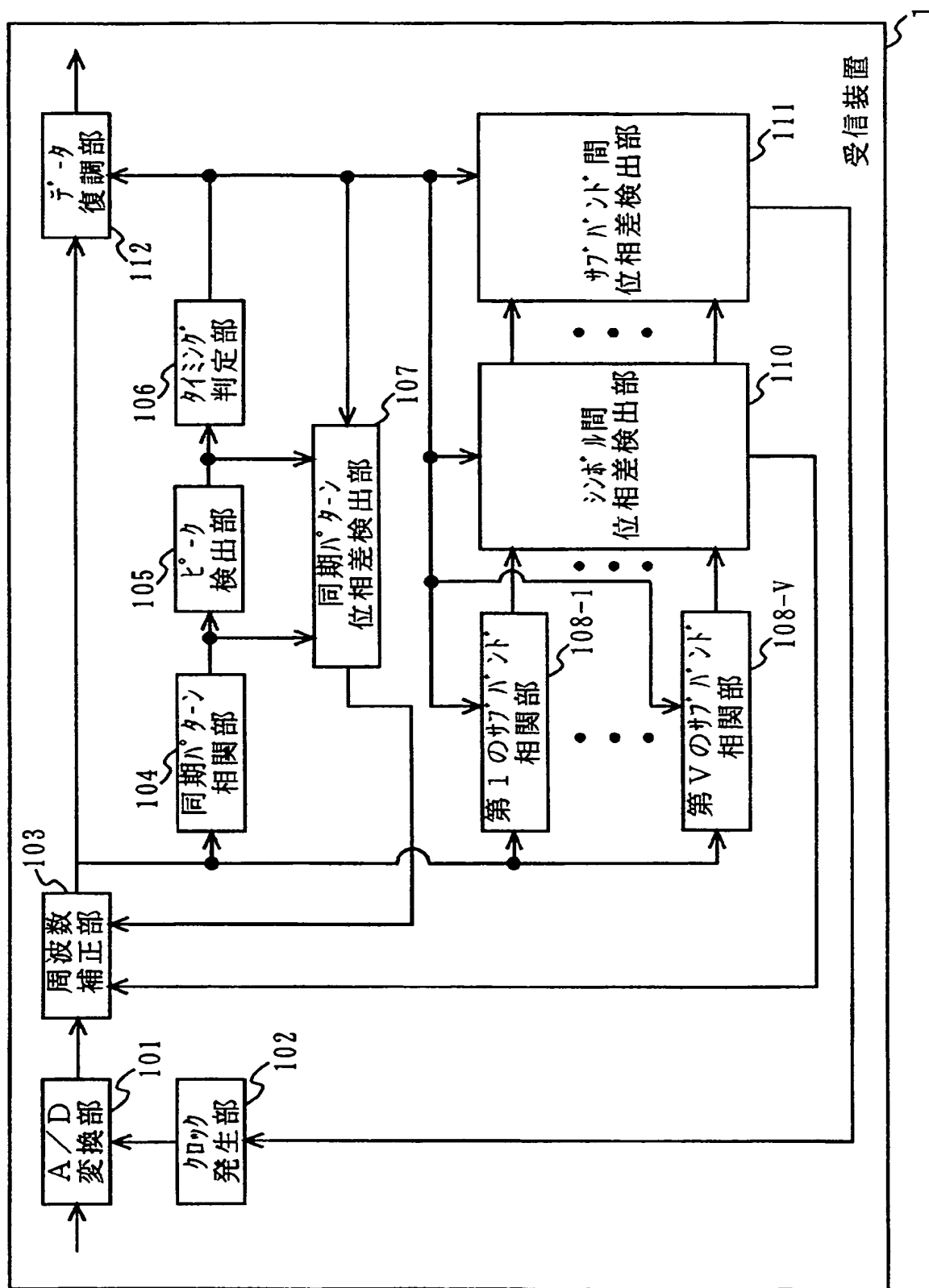
前記同期パターン相関値の位相の変化量に基づいて推定された周波数の誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換された信号の周波数を補正し、

前記シンボル間位相差に基づいて推定された周波数の誤差に基づいて、アナログ／デジタル変換された信号の周波数を補正し、

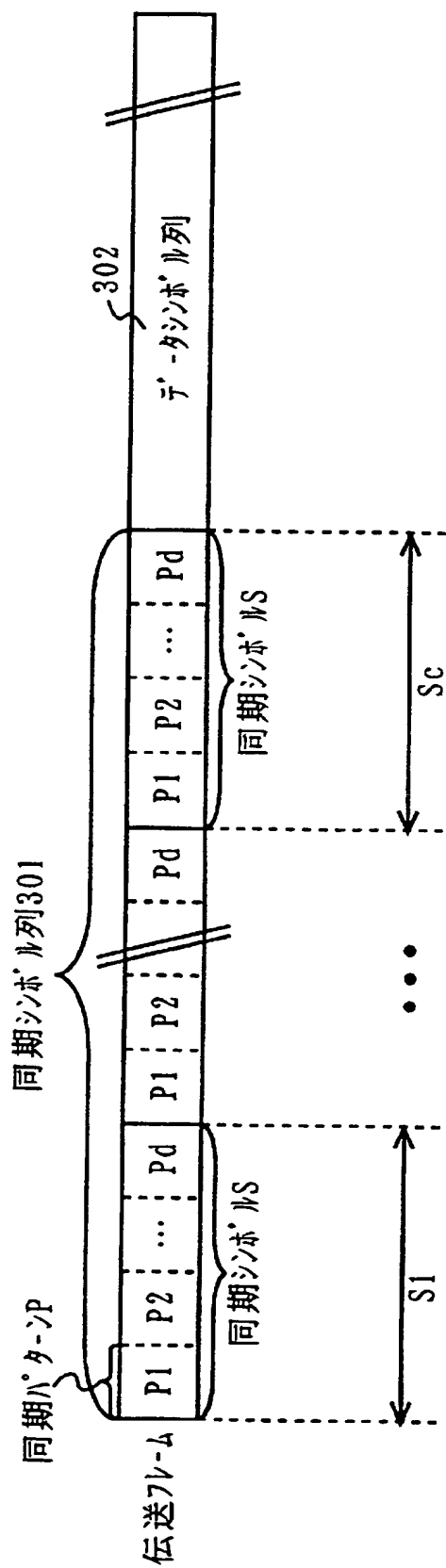
前記サブバンド間位相差に基づいて推定された前記サンプリングクロックの誤差に基づいて、前記サンプリングクロックの周波数を補正し、

補正されたアナログ／デジタル変換された信号を復調する、方法。

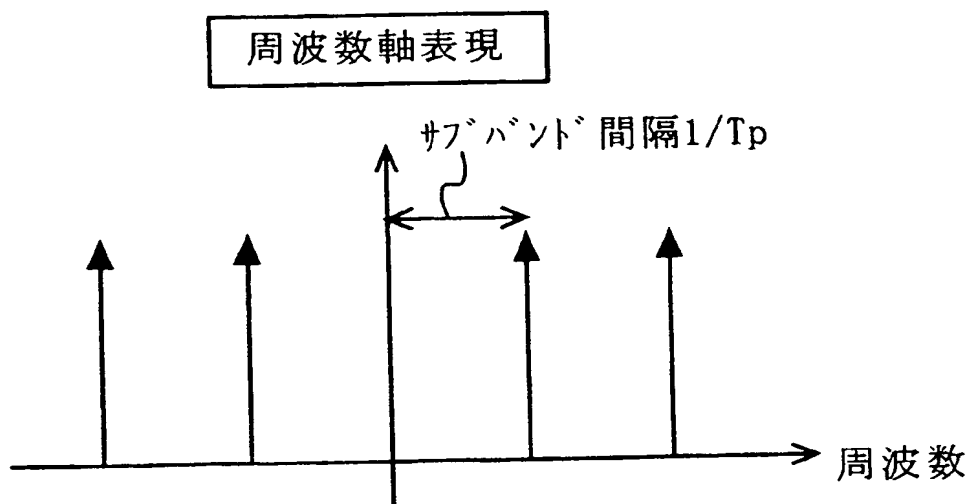
[図1]



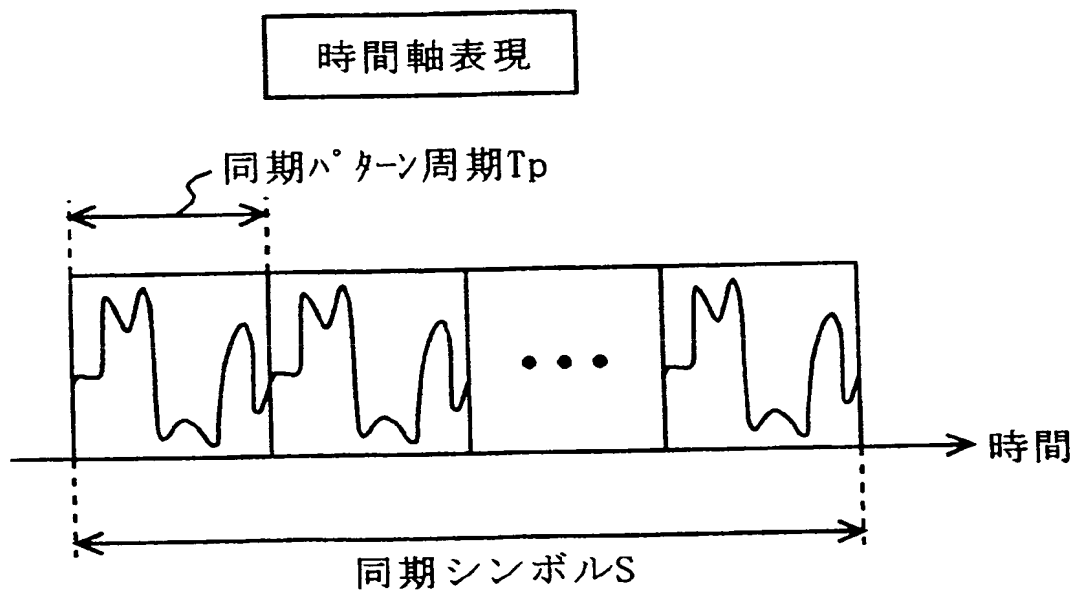
[図2]



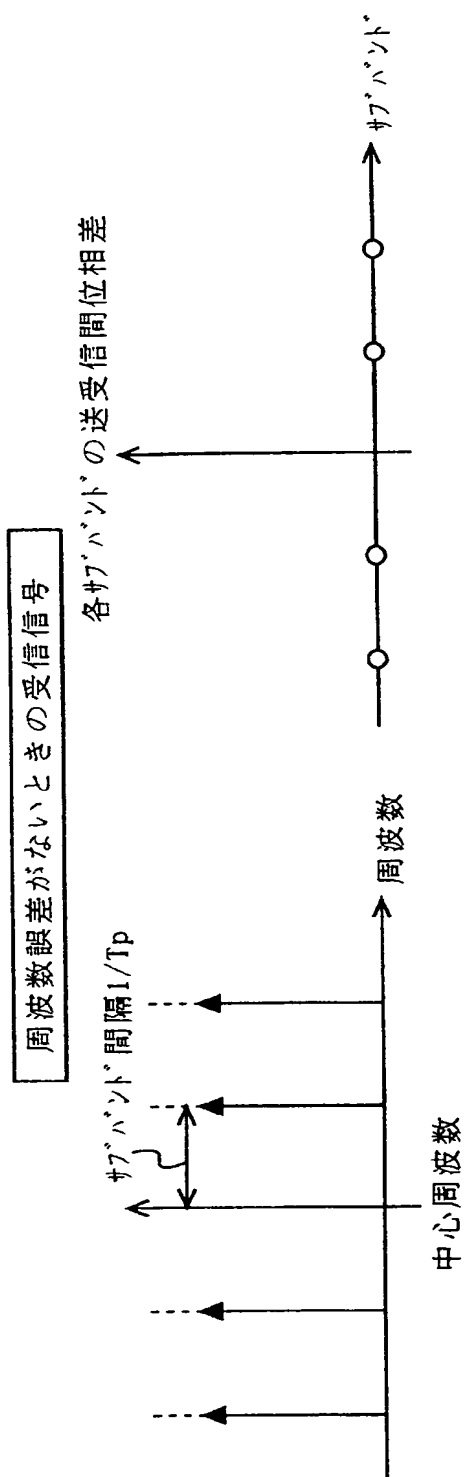
[図3A]



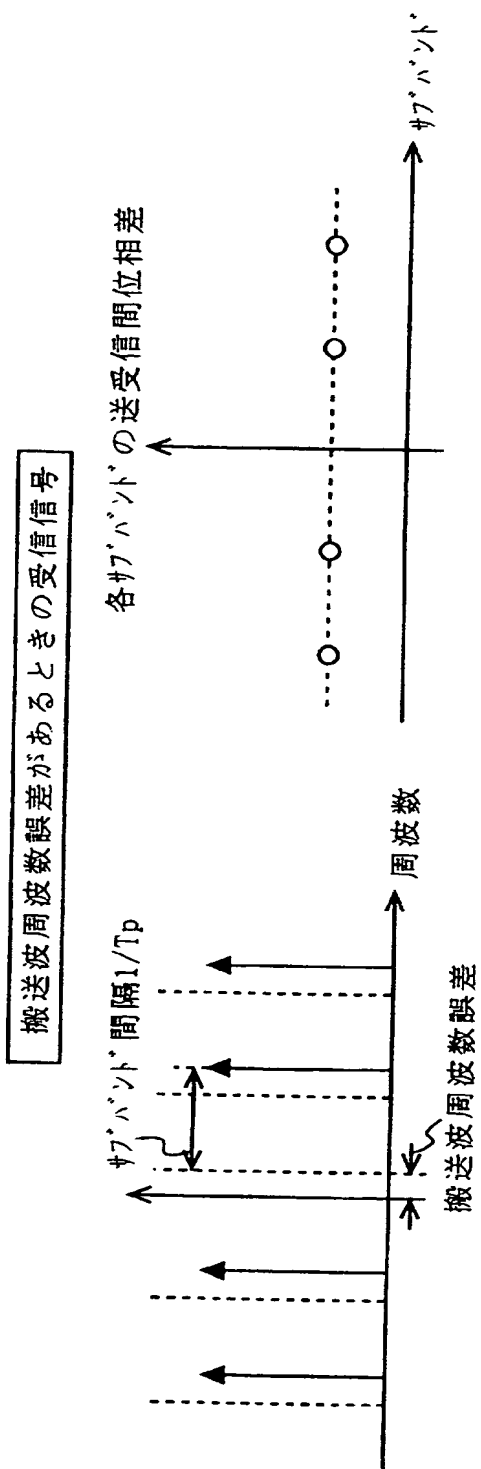
[図3B]



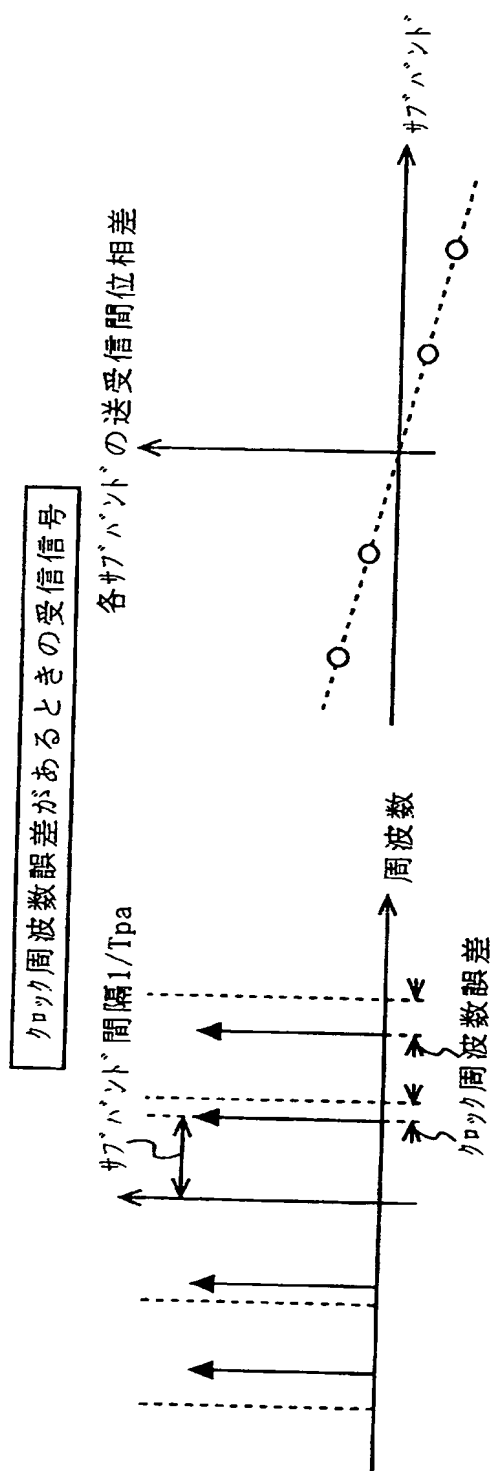
[図4A]



[図4B]

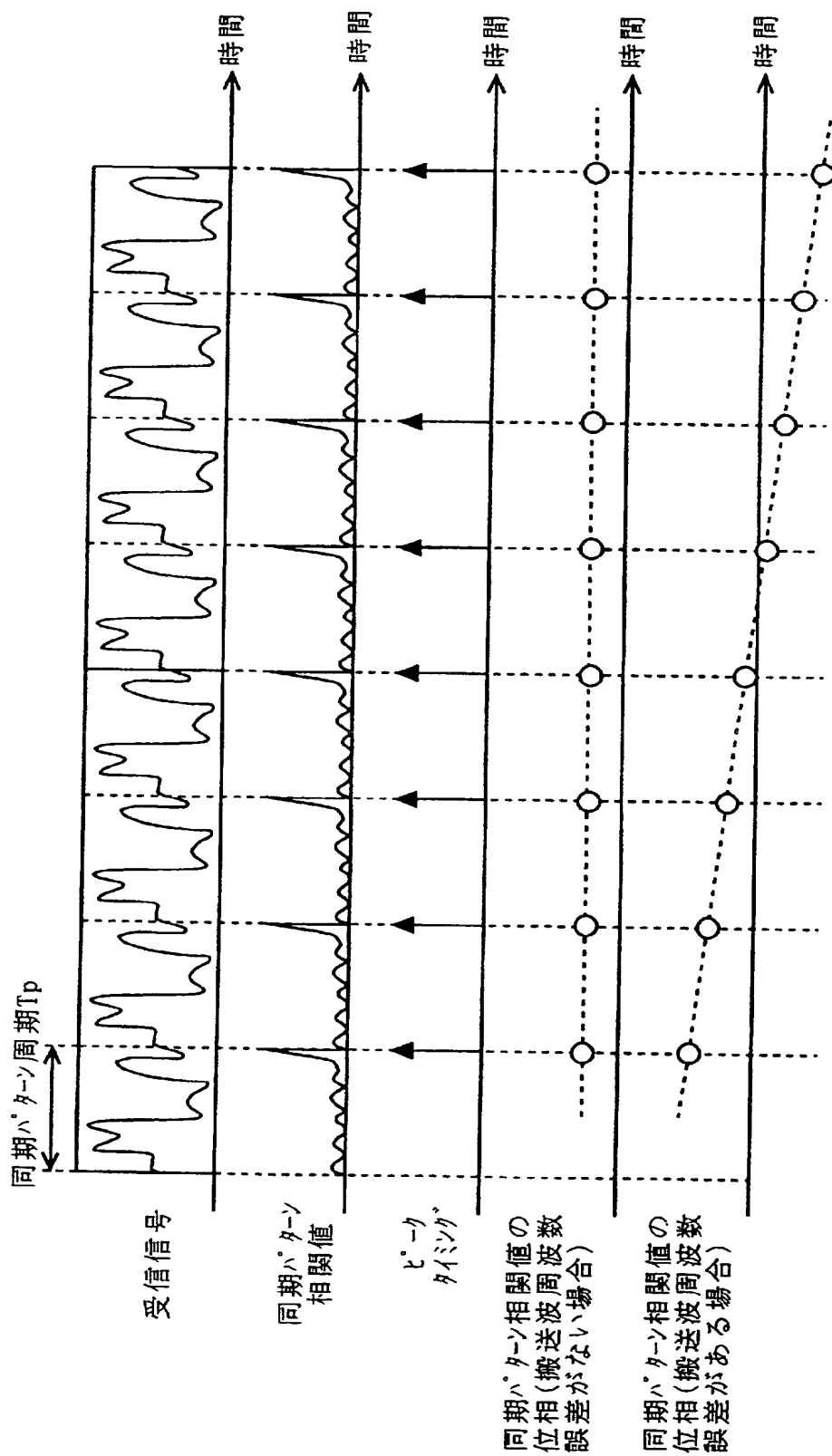


[図4C]

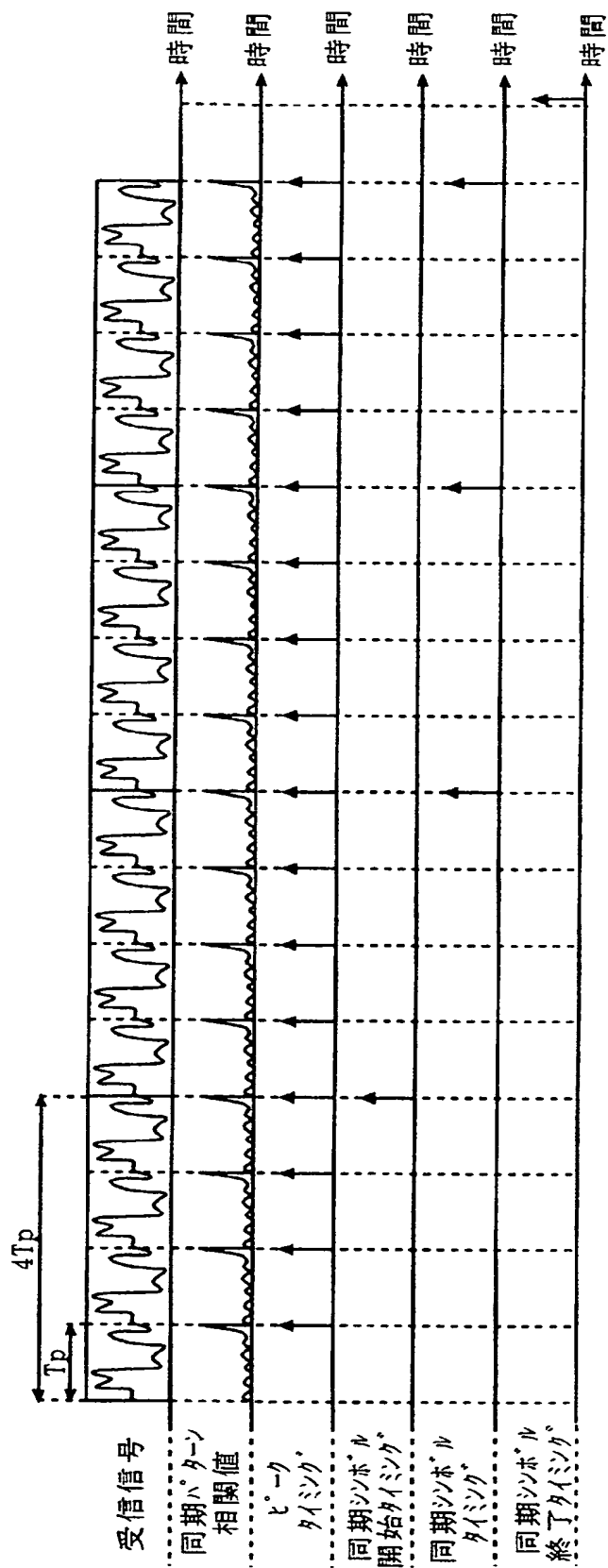




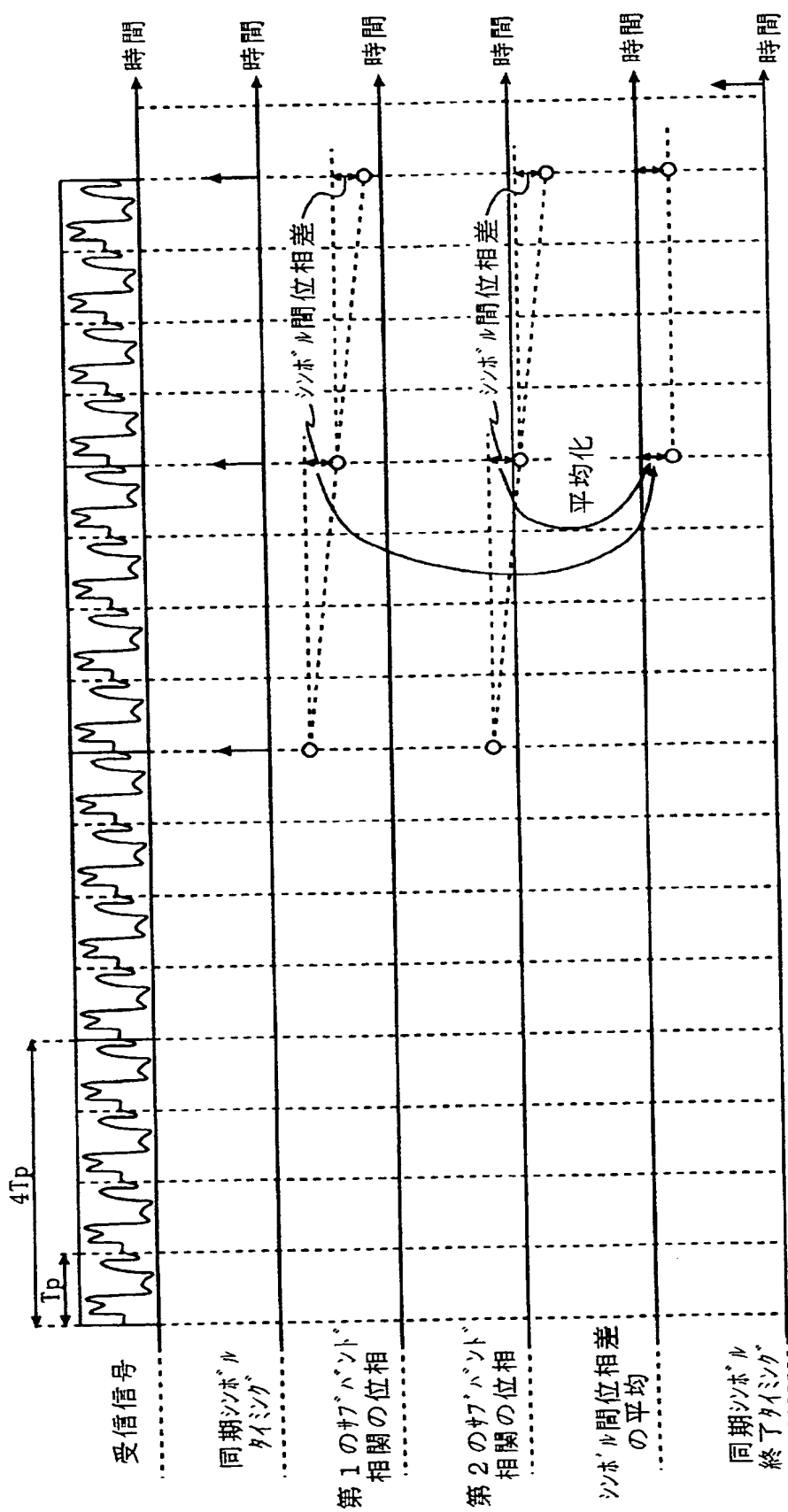
[図5]



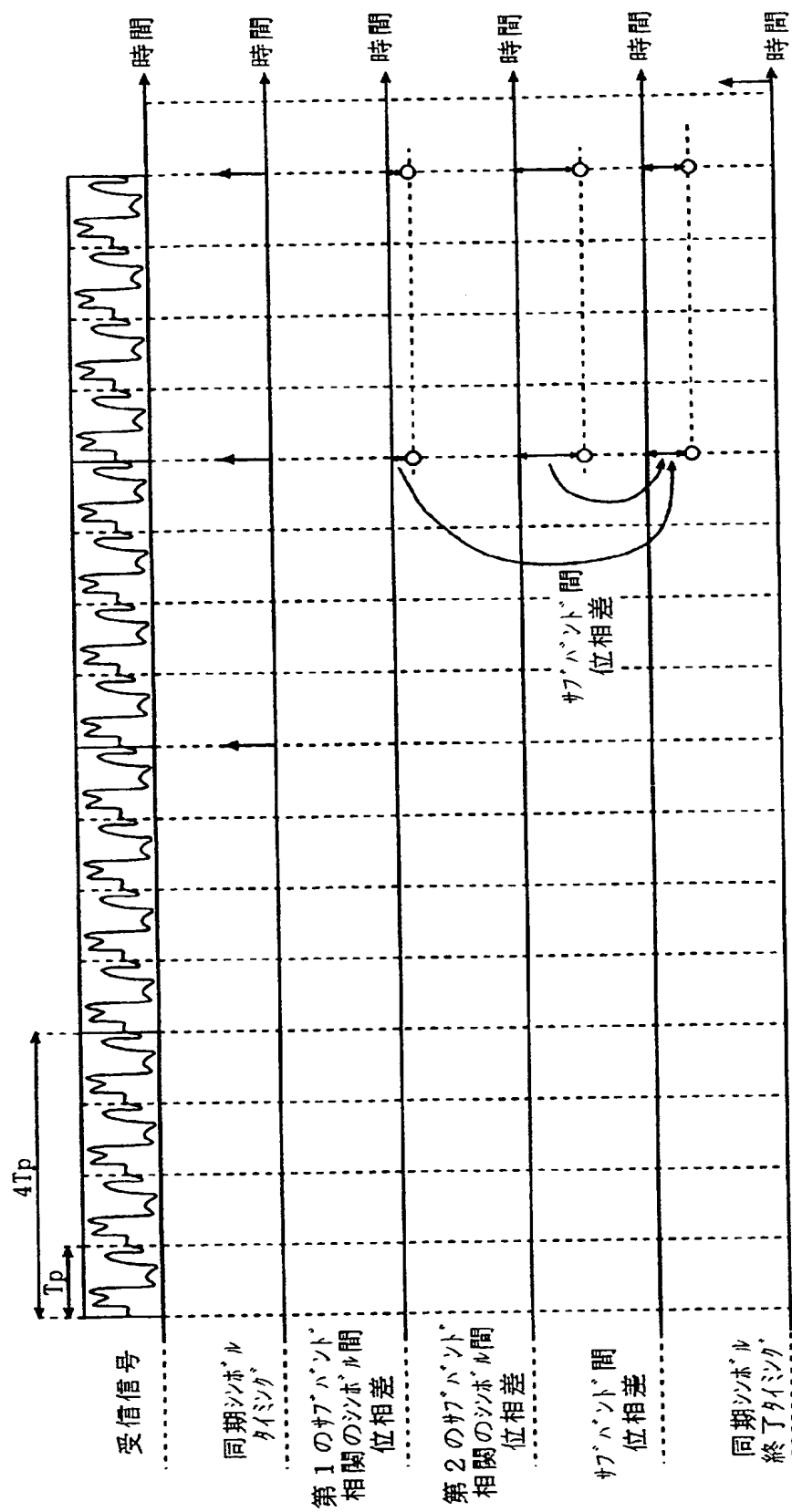
[図6]



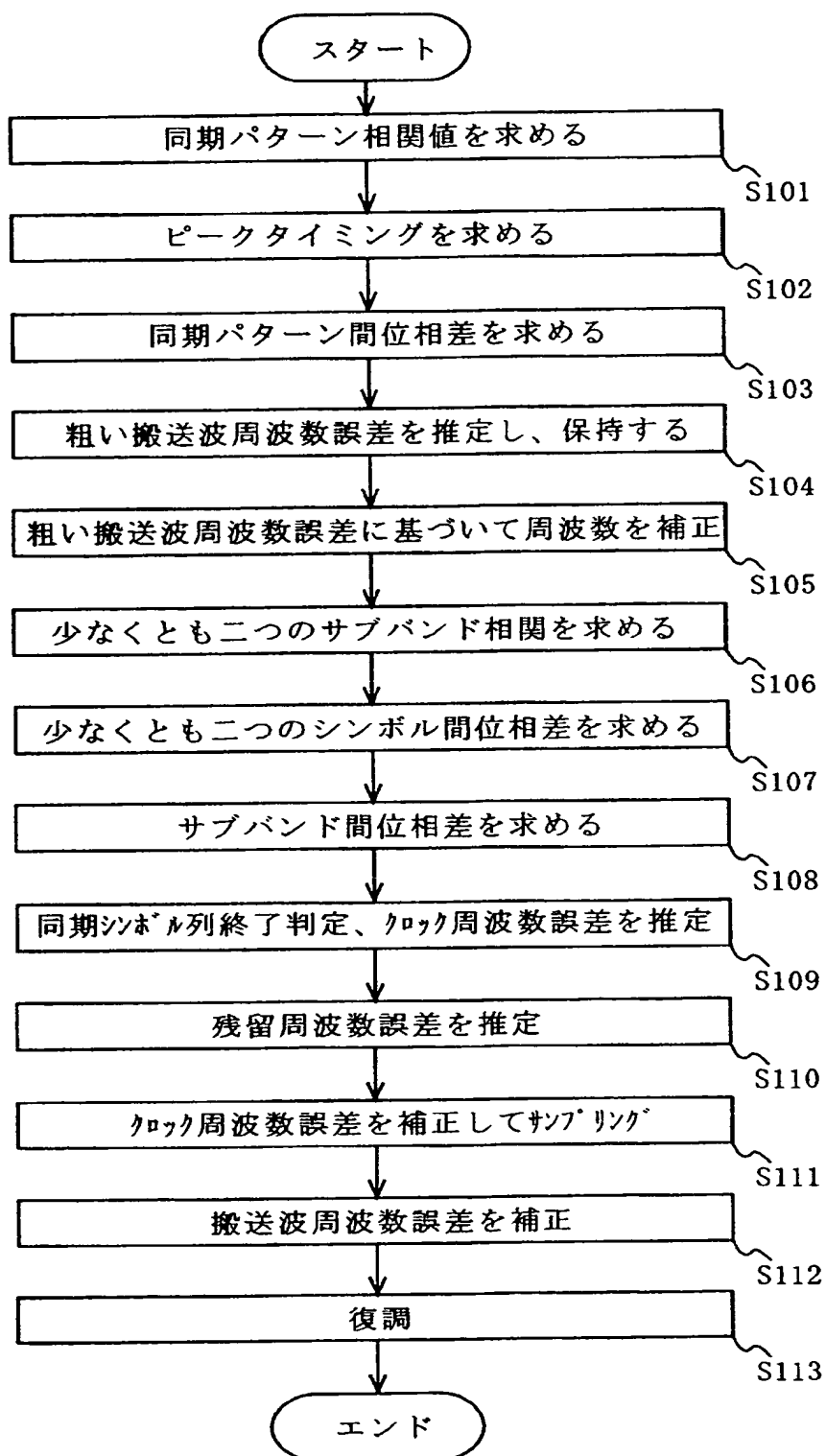
[図7]



[図8]



[図9]



[図10]

